

А. В. ТРЕТЬЯК, А. Ю. ШУТЬ, П. Г. ГАКАЛ, В. Р. ПОЛИЕНКО**ОСОБЕННОСТИ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ТЕПЛООВОГО СОСТОЯНИЯ ГИДРОГЕНЕРАТОРОВ КАПСУЛЬНОГО ТИПА**

АННОТАЦИЯ Выполнен анализ различных конструкций гидрогенераторов. Показаны достоинства и недостатки различных вариантов компоновки конструкции в зависимости от действия сил различной природы. Проведены расчётные исследования в трехмерной постановке по определению теплового состояния гидрогенераторов капсульного типа. Исследованы возможности введения дополнительного охлаждения для обмотки статора. Представлена возможность выполнения трёхмерных расчётов теплового состояния гидрогенераторов капсульного типа с воздушным охлаждением. Проведено исследование влияния типа турбины на напряжённое состояние генератора. В работе уделено внимание применению различных методик расчёта: метод развёрнутых тепловых (эквивалентных) схем; аналитическое решение теплового состояния; методы CFD (computational fluid dynamics) конечных элементов. Показано, что применение методов CFD возможно при дополнении существующих граничных условий. Определены начальные и граничные условия для расчёта сложноподвешенных составляющих конструкции. Впервые выполнен и верифицирован расчёт теплового состояния капсульного гидрогенератора с учётом основных и добавочных потерь. Результаты позволят повысить надёжность работы гидроэлектростанций и энергосистемы в целом.

Ключевые слова: гидрогенератор, тепловое состояние, капсульный тип, трехмерный расчет, вычислительная гидродинамика

O. TRETIYAK, O. SHUT, P. GAKAL, V. POLIENKO**FEATURES OF MATHEMATICAL MODELING OF THE THERMAL STATE OF THE BULB TYPE HYDROGENERATORS**

ABSTRACT The analysis of different Hydrogenerators designs was carried out. The advantages and lacks of various versions of the design arrangement depending upon action of different nature forces were shown. Calculation studies in three-dimensional model statement to determine the thermal state of the bulb type Hydrogenerators were carried out. The opportunity of carrying out of three-dimensional calculation of the thermal state of the bulb type Hydrogenerators with air cooling is submitted. The study of the turbine type influence to the stressed state of the generator was carried out. In the article the special attention is paid to application of various calculation methods namely the method of detailed thermal (equivalent) diagrams; Analytical solution of the thermal state; Methods of CFD (computational fluid dynamics) of finite elements. It is shown that the application of CFD (computational fluid dynamics) methods is possible with the addition of existing limiting conditions. Initial and limiting conditions for calculation of complicated stressed components of the design were determined. For the first time the calculation of the thermal state of the bulb Hydrogenerators taking into account the basic and additional parameters was carried out and verified. The results shall help improve the reliability of hydro- power plants and the power system as a whole.

Keywords: Hydrogenerator, thermal state, bulb type, three-dimensional calculation, computational fluid dynamics.

Введение

Конструкция гидрогенератора в значительной степени определяется характеристиками его привода – гидравлической турбины. Поэтому гидрогенератор является обычно тихоходной синхронной машиной; его скорость вращения редко превышает 500 об/мин, хотя встречаются гидрогенераторы со скоростью вращения до 1000 об/мин.

В зависимости от конструктивного типа турбины гидрогенератор может быть вертикального или горизонтального исполнения, а также существует капсульный тип гидрогенератора, где турбина и гидрогенератор объединены в одном корпусе, находящемся в проточной части гидроэлектростанции. Капсульные гидрогенераторы нашли широкое применение для низконапорных русловых, а также приливных ГЭС. Они характеризуются относительно небольшими час-

тотами вращения и искусственно уменьшенными радиальными размерами, что достигается использованием более эффективных, принудительных систем охлаждения. Единичная мощность капсульных гидроагрегатов не превышает 50 МВт, однако при необходимости она может быть значительно повышена.

Известным исполнениям вертикальных гидрогенераторов соответствуют свои модификации капсульных машин: подвесному – конструктивная схема с размещением подпятника и контрподпятника между турбиной и генератором, зонтичному – компоновка с расположением подпятника и контрподпятника со стороны, противоположной турбине (рис. 1).

В зарубежной практике иногда различают зонтичное и полужонтичное исполнения, понимая при этом под первым выполнение ротора в виде усеченного конуса благодаря изогнутой форме спиц остова. В этом случае достигается макси-

© А. В. Третьяк, А. Ю. Шуть, П. Г. Гакал, В. Р. Полиенко, 2017

мальное приближение плоскости трения подпятника к магнитной оси ротора. Под полузонтичным понимают обычную конструкцию с прямолинейными спицами ротора.

Существуют различные конструкции рабочих колес турбин гидрогенераторов (рис. 2). У радиально-осевых турбин лопасти рабочего колеса имеют сложную кривизну, поэтому вода, поступающая с направляющего аппарата, постепенно меняет направление с радиального на осевое. Такие турбины используют в широком диапазоне напоров от 30 до 600 м. В настоящее время созданы уникальные радиально-осевые турбины мощностью 700 МВт.

Цель работы

Определение теплового состояния гидрогенератора капсульного типа в трехмерной постановке с учетом основных добавочных электрических потерь, вентиляционных потерь и вызванных трением.

Системы охлаждения капсульного гидрогенератора

В капсульных гидрогенераторах (рис. 3) применяется принудительное охлаждение. Это прежде всего жидкостные системы непосредственного охлаждения обмоток и сердечников. Внедрение этих систем, характеризующихся большей эффективностью и экономичностью, позволило повысить удельные электромагнитные и тепловые нагрузки машин и ее единичную мощность. При этом в гидрогенераторах в качестве охлаждающего агента используется вода. Обмотки и шины обмотки статора охлаждаются непосредственно водой, обмотки возбуждения выполнены с форсированным воздушным охлаждением.

Переход на принудительную систему охлаждения оказался вынужденным. Получили развитие две принципиально отличные системы охлаждения крупных капсульных машин: аксиальная – воздухом нормального или повышенного давления и непосредственное водяное охлаждение.

При аксиальной воздушной системе охлаждения мощность, затрачиваемая на вентиляцию генератора, становится весьма значительной и КПД резко снижается. Именно это обстоятельство заставляет в крупных капсульных генераторах повышать давление воздуха; при этом потери на вентиляцию снижаются пропорционально абсолютному давлению [1].

Использование непосредственного водяного охлаждения обмоток статора и ротора, а также сердечников полюсов устранило все указанные выше трудности, полностью исключило необходимость искусственной циркуляции воздуха в генераторе, так как при надлежащем выборе мате-

риалов и размеров у капсульных машин потери в сердечнике статора отводятся водой, протекающей по каналам в проводниках обмотки статора.

Помимо получения обычных преимуществ (снижение габаритов и массы), водяное охлаждение применительно к капсульным гидрогенераторам большой мощности позволяет также значительно упростить конструкцию ряда узлов и повысить надежность работы оборудования.

Методы определения теплового состояния электрических машин

В настоящее время существует несколько методов определения теплового состояния электрических машин и, в частности, турбогенераторов:

1 Метод развернутых тепловых (эквивалентных) схем.

2 Аналитическое решение теплового состояния.

3 Методы *CFD* (*computational fluid dynamics*) конечных элементов.

При проектировании и создании генератора используют современные методы математического моделирования *CFD*. Примечательно, что часть узлов, которые в классике изготавливаются на предприятиях завода изготовителя выполняются на станции. Данное обстоятельство говорит о достаточной точности методиках расчетов и моделирования, т.к. большое количество сварных соединений требует повсеместного учета тепловых и механических нагрузок [2].

Проведя обзоры литературы можно сделать вывод, что компания *Andritz* и *Alstom* являются флагманами в использовании современных методов расчета.

Метод развернутых тепловых (эквивалентных) схем

Метод развёрнутых эквивалентных схем (МЭС) замещения является самым распространённым методом определения температурного поля в электрических машинах (ЭМ).

По этому методу ЭМ условно расчленяется на тела простой геометрической формы, в пределах которых условия охлаждения остаются примерно постоянными. В настоящее время подавляющее большинство тепловых расчетов электрических машин выполняется на основе эквивалентных схем замещения. При этом параллельное сложение термических сопротивлений применяют для решения не только двухмерных, но и трехмерных задач, когда суммируются тепловые сопротивления по трем направлениям потока. Последнее делается без дополнительного теоретического обоснования.

МЭС позволяет применять в тепловом расчете известные принципы наложения (суперпозиции) и обратимости.

Одним из наиболее существенных преимуществ данного метода является простота. Однако МЭС не позволяет производить расчеты температурного распределения в узлах, а дает решение лишь для характерной точки конструктивного элемента. Данный недостаток не дает возможности глубокого исследования температурного состояния ЭМ и применим лишь на начальных, прикладных этапах расчетов.

Аналитический метод определения теплового состояния

Вторым по применимости является аналитический метод определения температурных полей, заключающийся в решении дифференциальных уравнений, описывающих распределение температуры вдоль узлов и деталей турбогенераторов.

Система дифференциальных уравнений, описывающих распределение температуры вдоль обмотки статора и вдоль пакета железа статора, имеет вид:

$$\begin{aligned}\lambda_M S_M \frac{d^2 T_1}{dx_1^2} + p_{10}(1 + \beta T_1) - \Delta_1(T_1 + T_0) &= 0, \\ \lambda_M S_M \frac{d^2 T_2}{dx_2^2} + p_{20}(1 + \beta T_2) - \Delta_2(T_2 + T_0) &= 0, \\ \lambda_M S_M \frac{d^2 T_3}{dx_3^2} + p_{30}(1 + \beta T_3) - \Delta_{35}(T_3 - T_5) - \\ - \Delta_{34}(T_3 - T_4) &= 0, \\ \lambda_M S_M \frac{d^2 T_4}{dx_4^2} + p_{40}(1 + \beta T_4) - \Delta_{45}(T_4 - T_5) - \\ - \Delta_4(T_4 - T_0) &= 0, \\ \lambda_{СП} S_C \frac{d^2 T_5}{dx_5^2} + p_{50} - \Delta_{35}(T_5 - T_3) - \\ - \Delta_{45}(T_5 - T_4) - \Delta_5(T_5 - T_0) &= 0.\end{aligned}$$

Расчётная модель представлена на рис. 4. Двухслойная обмотка разбита на четыре участка. Участок 1 лобовой части связан по всей длине $l_{л1}$ с хладагентом удельной проводимостью Δ_1 , определяемой изоляционным слоем, конструктивными элементами и коэффициентом теплоотдачи. Теплоотвод на участке 2 лобовой части длиной $l_{л2}$ определяется удельной теплопроводностью Δ_2 . Слои пазовой части обмотки 3 и 4 с длиной $l_{л2} = l_{л4}$ связаны взаимной теплопроводностью Δ_{34} . Условия охлаждения над пакетом статора описываются удельной теплопроводностью Δ_5 , а охлаждение в зазоре – удельной проводимостью Δ_4 .

Система дифференциальных уравнений, описывающих распределение температуры вдоль обмотки статора и вдоль пакета железа статора, представлена в работе [3].

С учетом выбранных направлений координат x_i задача решается для последующих граничных условий:

1 Симметричное охлаждение статора:

$$\left. \frac{dT_3}{dx_3} \right|_{x_3=0}, \left. \frac{dT_4}{dx_4} \right|_{x_4=0}.$$

2 Равенство температур в сопрягаемых сечениях участков:

$$\begin{aligned}T_1|_{x_1=l_{л1}} = T_2|_{x_2=l_{л2}}, T_1|_{x_1=0} = T_3|_{x_3=l_{л3}}, \\ T_2|_{x_2=0} = T_4|_{x_4=l_{л4}}.\end{aligned}$$

3 Равенства тепловых потоков в сопрягаемых сечениях участков:

$$\begin{aligned}\left. \frac{dT_1}{dx_1} \right|_{x_1=l_{л1}} = \left. \frac{dT_2}{dx_2} \right|_{x_2=l_{л2}}, \left. \frac{dT_1}{dx_1} \right|_{x_1=0} = \left. \frac{dT_3}{dx_3} \right|_{x_3=l_{л3}}, \\ \left. \frac{dT_2}{dx_2} \right|_{x_2=0} = \left. \frac{dT_4}{dx_4} \right|_{x_4=l_{л4}}.\end{aligned}$$

Согласно расчётам и экспериментальным данным максимальное значение температуры находится на неохлаждаемом участке лобовой части обмотки статора.

Из определенного решения теплового состояния возможно определение температуры статора и статорной обмотки лишь вдоль длины, а реальное определение температуры в сечении, при кратковременных режимах короткого замыкания невозможно. Поэтому данная методика может быть применена при эскизном проектировании турбогенератора, которая требует определения реальной конструкции.

Метод конечных элементов определения температурного поля CFD

Анализ методов моделирования тепловых полей в электромеханических системах показал, что для численного решения задач теплопередачи наиболее простым в реализации и удовлетворительным по скорости сходимости и точности решения является метод конечных элементов (МКЭ) [4]. Данный метод очень широко применяется в современных прикладных программных продуктах (типа *ANSYS*, *FEMM*, *ELCUT*) для моделирования тепловых, электромагнитных и других полей.

В диссертационной работе Глухова Д.М. разработана математическая модель теплового поля многофазного асинхронного двигателя (АД), позволяющая исследовать его установившиеся и аварийные режимы работы, а также тепловую напряжённость отдельных участков статора.

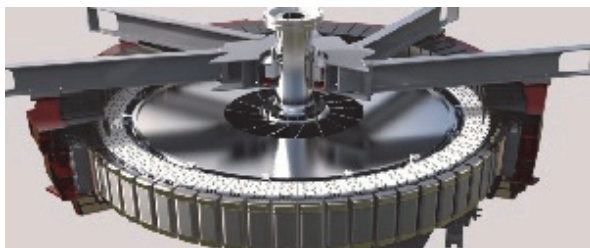


Рис. 1 – Вертикальный гидрогенератор конструкции Andritz

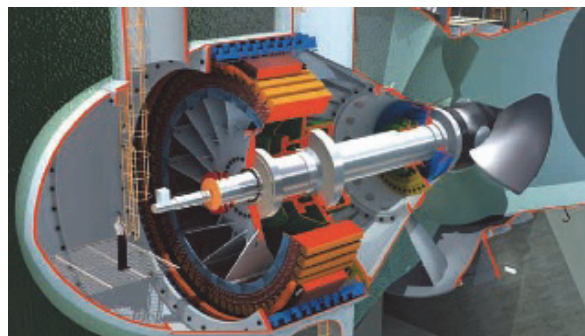


Рис. 3 – Капсульный гидрогенератор

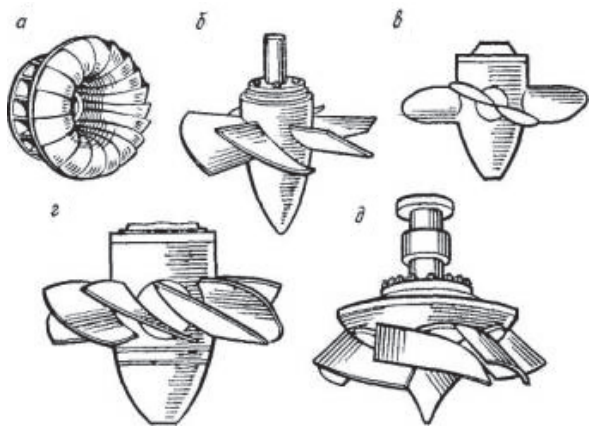


Рис. 2 – Общий вид рабочих колес реактивных турбин: а – радиально-осевая; б – пропеллерная; в – поворотн-лопастная; г – двухперовая, диагональная

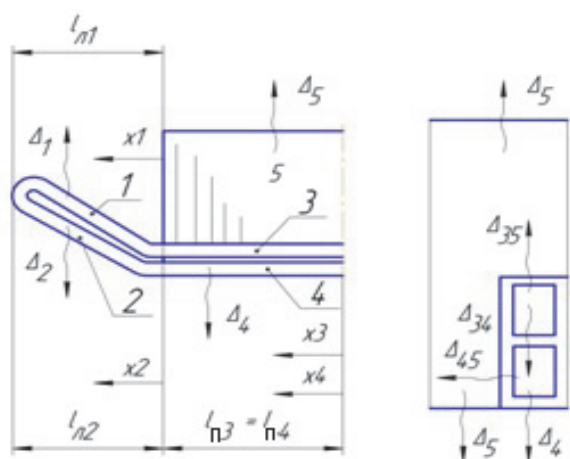


Рис. 4 – Схема расчетной модели двухслойной обмотки статора электрической машины

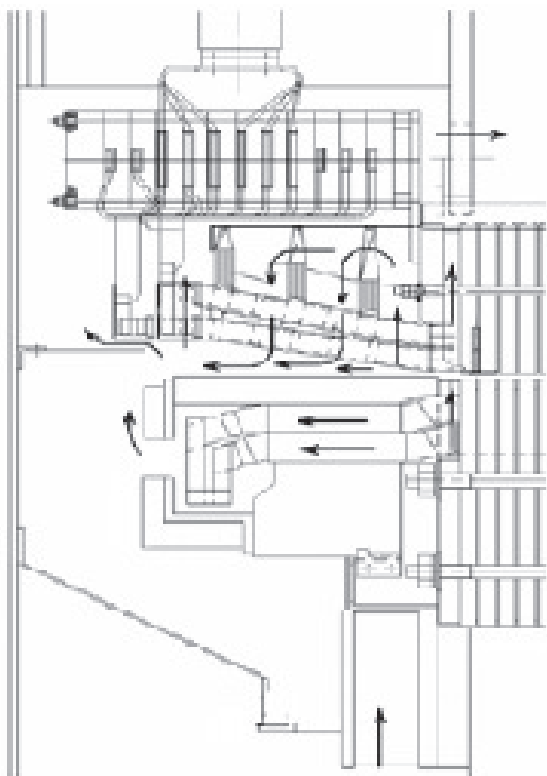
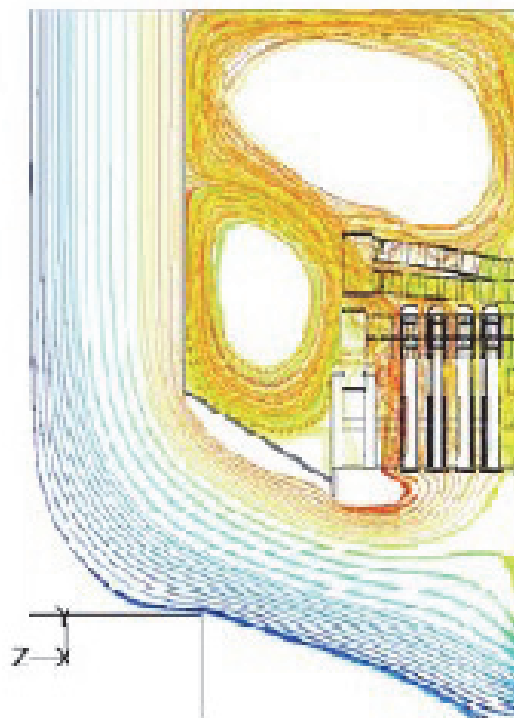


Рис. 5 – Линии тока в лобовой части ЭМ



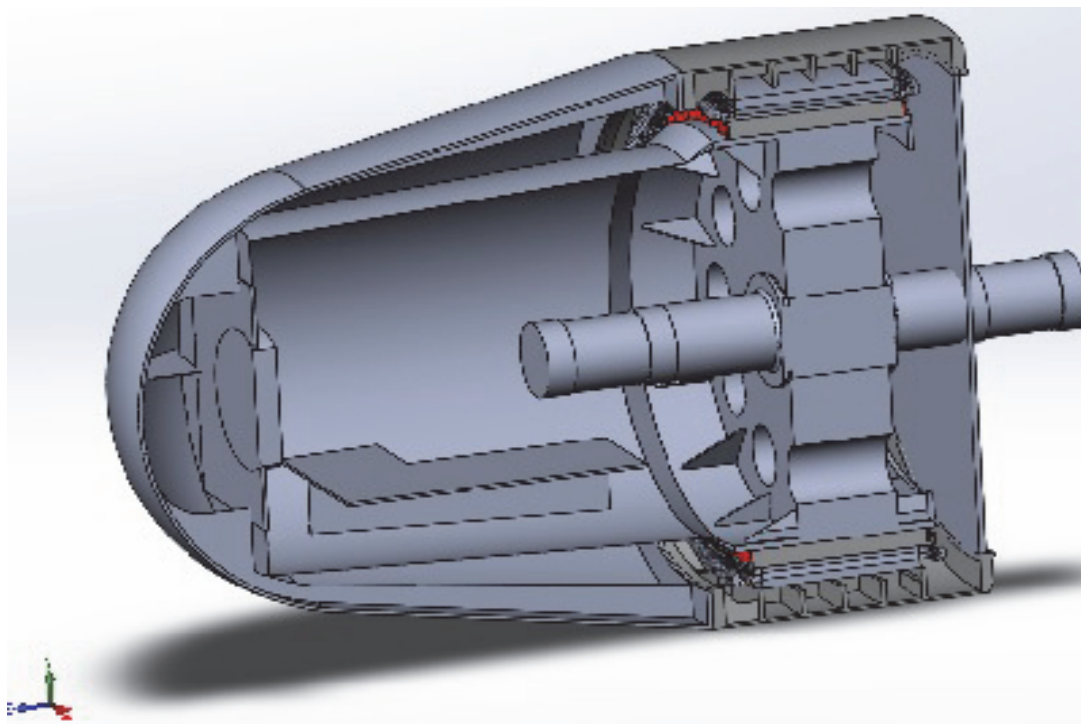


Рис. 6 – Трёхмерная модель гидрогенератора капсульного типа

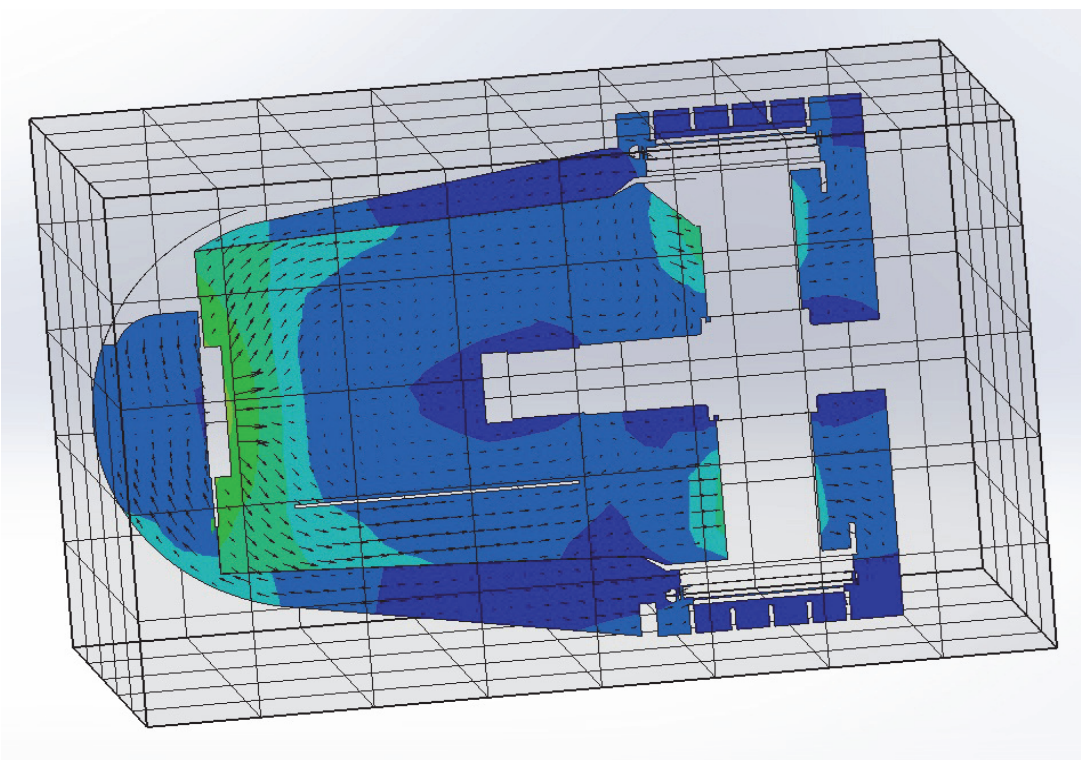


Рис. 7 – Результаты расчёта в трёхмерной модели

Методика позволяет рассчитывать коэффициенты теплоотдачи с поверхности оболочки электрической машины для использования их в уточнённых расчётах тепловой напряжённости отдельных участков изоляции обмотки статора многофазного асинхронного двигателя.

В третьем разделе диссертации Глухова Д.М. приведены результаты исследований двухмерных тепловых полей поперечного сечения АД в различных режимах работы.

Для моделирования теплового поля ЭМ в нормальных (симметричных) и аномальных (не-

симметричных, сопровождающихся обрывом фазы) режимах работы была предложена следующая математическая модель.

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{1}{r_1} \frac{\partial}{\partial r_1} \left(\lambda_{r1} \frac{\partial T}{\partial r_1} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) = -q_1 - c\rho \frac{\partial T}{\partial t}, \\ \frac{1}{r_2} \frac{\partial}{\partial r_2} \left(\lambda_{r2} \frac{\partial T}{\partial r_2} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) = -q_2 - c\rho \frac{\partial T}{\partial t}, \\ \dots\dots\dots \\ \frac{1}{r_n} \frac{\partial}{\partial r_n} \left(\lambda_{rn} \frac{\partial T}{\partial r_n} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) = -q_n - c\rho \frac{\partial T}{\partial t}, \end{array} \right.$$

где T – температура; t – время; $\lambda(z, r)$ – компоненты тензора теплопроводности; λ – теплопроводность материала; q – удельная мощность тепловыделения; c – удельная теплоемкость материала; ρ – плотность материала.

В качестве инструмента конечно-элементного моделирования полевых задач на основе математической модели использован российский пакет *ELCUT 4.2T*, который позволяет производить линейный и нелинейный температурный анализ в плоской и осесимметричной постановке.

В работе [5] представлено частичное решение проблемы расчета системы вентиляции электрической машины, только лишь для зоны лобовых частей (рис. 5).

Расчет и особенности моделирования теплового состояния на примере гидрогенераторов капсульного типа

Одним из представителей семейства капсульных гидрогенераторов является агрегат расположенный на Каневской ГЭС и Киевской ГЭС, спроектированный и построенный на ГП «ЗАВОД «ЭЛЕКТРОЯШМАШ».

Стоит обратить внимание, что для науки эти машины представляют особый интерес, т.к. были рассчитаны методиками 50-х годов, эксплуатировались и модернизировались вместе с научным прогрессом. При вводе эксплуатации, для серийных образцов были проведены глубокие испытания.

Энергетические исследования гидрогенератора № 4, выполненные Ленинградским отделением Гидропроекта в 1969 г., имели своей целью экспериментальное определение величин отдельных потерь в гидрогенераторе для определения мощности на валу турбины при ее энергетических испытаниях. Выполнялось сопоставление экспериментальных и расчетных значений величин отдельных потерь в генераторе.

Учитывая, что при определении КПД капсульных гидрогенераторов Киевской ГЭС существенное влияние на его величину имеют потери на вентиляцию и возбуждение, составляющие неотъемлемую часть общих потерь генератора, при ис-

пытаниях были отдельно определены мощности, потребляемые вентиляторной и возбудительной установками, питающимися от шин гидрогенератора.

Испытания по определению КПД гидротурбинатора № 4 выполнены согласно ГОСТ 183-55 методом самоторможения при осушенной турбине.

Испытания по самоторможению проведены в диапазоне скоростей вращения от 80 до 120 % номинальной скорости.

Энергетические исследования капсульного генератора № 4 Киевской ГЭС показали, что:

а) действительный его КПД (согласно ГОСТ 183-55) отличается от расчетного значения следующим образом:

P_a , %	10;	25;	50;	75;	100;	125;
КПД	+2,69	+1,14	+0,43	+0,05	-0,09	+0,55

б) характер зависимости опытного КПД от нагрузки также отличается от расчетной зависимости; при нагрузке 100 % номинальное опытное значение КПД ниже расчетного на 0,09 %, а в остальных режимах – выше расчетного.

При выполнении расчета теплового состояния капсульного гидрогенератора был реализован расчет теплового состояния всей конструкции с учетом основных и добавочных электрических потерь, вентиляционных потерь и вызванных силами трения. Для обеспечения наиболее точного теплового состояния электрической машины построена подробная трехмерная модель конструкции (рис. 6).

В данной работе в качестве средства моделирования использован прикладной программный пакет *SolidWorks* и в частности его модуль для моделирования течения жидкостей и газов – *Flow simulation*. *Flow simulation* – программное обеспечение, полностью интегрированное в *SolidWorks* для расчёта жидкостных и газовых потоков внутри и снаружи модели *SolidWorks*, а также рассчитывающее теплопередачу от, к и между этими моделями конвекцией, излучением и теплопроводностью с помощью технологий вычислительной гидрогазодинамики (CFD) [6]. *Flow Simulation* моделирует движение потока, на основе решения уравнения Навье-Стокса, которое являет интерпретацией законов сохранения массы, импульса и энергии для потока жидкости. Уравнения дополнены выражениями состояния жидкости, которые определяют природу жидкости и эмпирическими зависимостями плотности, вязкости и теплопроводности жидкости от температуры.

Однако, если провести детальный анализ, недостатком приведенного решения является частичное моделирование теплового состояния машины. Как следствие, одним из существенных упущений является невозможность учесть основные и добавочные потери.

Законы сохранения массы, импульса и энергии для потока жидкости в декартовой системе

координат, которая вращается с угловой скоростью Ω вокруг оси, проходящей через начало системы координат можно записать следующим образом:

$$\begin{aligned}\frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(p u_i) &= 0, \\ \frac{\partial p u_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(p u_i u_i) + \frac{\partial p}{\partial x_i} &= \frac{\partial}{\partial x_j}(\tau_{ij} + \tau_{ij}^R) + S_i, \\ \frac{\partial p H}{\partial t} + \frac{\partial p u_i H}{\partial x_i} &= \frac{\partial}{\partial x_j} \left[u_i (\tau_{ij} + \tau_{ij}^R) + q_i \right] + \frac{\partial p}{\partial t} - \\ &- \tau_{ij}^R \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + p \epsilon + S_i u_i, \\ H &= h + \frac{u^2}{2}.\end{aligned}$$

Обсуждение результатов

В представленной работе, впервые решена задача расчета теплового состояния гидрогенератора в трехмерной постановке (рис. 7).

Она отличается от существующих тем, что при выполнении расчета были учтены все особенности конструкции генератора, включая лобовые части стержневых обмоток, а также уточнены начальные и граничные условия. В расчете учтены добавочные потери, путем решения обратной задачи.

Выводы

Проведен анализ достоинств и недостатков существующих конструкций гидрогенераторов.

Выполнено сравнение расчетных значений полученными различными методами расчета теплового состояния гидрогенератора с экспериментальными.

Разработан алгоритм расчета и выработаны рекомендации для расчета теплового состояния гидрогенератора капсульного типа.

Список литературы

- 1 **Кобзар, К. О.** Аналіз причин пошкодження турбогенераторів та гідрогенераторів шляхом визначення складнонапруженого стану деталей / **К. О. Кобзар, О. Ю. Шуть, О. О. Овсянникова, О. В. Сенецький, О. В. Третяк** // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – № 8(1180). – С. 136–142. – Бібліогр.: 13 назв. – ISSN 2078-774X. – doi: 10.20998/2078-774X.2016.08.19.
- 2 **Tabernero, A.** Predictive Maintenance in hydrogenerators [Electronic resource] / **A. Tabernero, B. Batlle** // Presented in Hydro 2007. – Spain, Granada. – 2007. – С. 1–8. – Режим доступа: или URb: [http://www.unitronics-](http://www.unitronics-electric.com/pdf/Paper_Hydro_Marketing_low.pdf)

[electric.com/pdf/Paper_Hydro_Marketing_low.pdf](http://www.unitronics-electric.com/pdf/Paper_Hydro_Marketing_low.pdf). – 07.01.2017.

- 3 **Борисенко, А. И.** Охлаждение промышленных электрических машин / **А. И. Борисенко, О. Н. Костиков, А. И. Яковлев**. – Москва: Энергоатомиздат, 1983. – 297 с. : ил. ; 21 см.
- 4 **Алямовский, А. А.** Компьютерное моделирование в инженерной практике / **А. А. Алямовский**. – Санкт-Петербург : БХВ-Петербург, 2005. – С. 163–170.
- 5 **Neumayer, F.** Methods for Fixation of the Rotor Winding Overhang of Large Asynchronous Hydrogenerators / **F. Neumayer, F. Ramsauer, M. Himmelreich, G. Kastner** // Colloquium on new development of rotating electrical machines. – Beijing, China. – 2011. – С. 86–92. – ISSN 0885-8969.
- 6 **Ошовский, В. В.** Использование компьютерных систем конечно-элементного анализа для моделирования гидродинамических процессов / **В. В. Ошовский, Д. И. Охрименко, А. Ю. Сысоев** // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: Хімія і хімічна технологія. – 2010. – Вип. 15. – ISSN 2074-6652.

Bibliography (transliterated)

- 1 **Kobzar, K., Shut, O., Ovsianynkova, O., Senetskyi, O. and Tretiak, O.** (2016), "Analysis of causes of turbogenerators and hydrogenerators damages by the method of determination of complicated stressed state of the parts", *Bulletin of NTU "KhPI". Series: Power and heat engineering processes and equipment*, no. 8(1180), pp. 136–142, ISSN 2078-774X, doi: 10.20998/2078-774X.2016.08.19.
- 2 **Tabernero, A. and Batlle, B.** (2007), "Predictive Maintenance in hydrogenerators", *Presented in Hydro 2007*, Spain, Granada, pp. 1–8, available at: http://www.unitronics-electric.com/pdf/Paper_Hydro_Marketing_low.pdf (accessed 7 January 2017).
- 3 **Borisenko, A. I., Kostikov, O. N. and Yakovlev, A. I.** (1983), *Ohlazhdenie promyshlennyykh elektricheskikh mashin [Cooling of industrial electric machines]*, Energoatomizdat, Moscow, Russia.
- 4 **Alyamovskiy, A. A.** (2005), *Kompyuternoe modelirovanie v inzhenernoy praktike [Computer modeling in engineering practice]*, BHV-Peterburg, St. Petersburg, pp. 163–170.
- 5 **Neumayer, F., Ramsauer, F., Himmelreich, M. and Kastner, G.** (2011), "Methods for Fixation of the Rotor Winding Overhang of Large Asynchronous Hydrogenerators", *Colloquium on new development of rotating electrical machines*, Beijing, China, pp. 86–92, ISSN 0885-8969.
- 6 **Oshovskiy, V. V., Ohrimenko, D. I. and Syisoev, A. Yu.** (2010), "Ispolzovanie kompyuternykh sistem konechno-elementnogo analiza dlya modelirovaniya gidrodinamicheskikh protsessov [Use of computer finite element analysis systems for simulation of hydrodynamic processes]", *NaukovI pratsI Donetskogo natslionalnogo tehnIchnogo unIversitetu. Seriya: Himiya i himicheskaya tehnologiya [Scientific works of Donetsk National Technical University. Series: Chemistry and Chemical Technology]*, No. 15, ISSN 2074-6652.

Сведения об авторах (About authors)

Третьяк Алексей Владимирович – кандидат технических наук, ГП «ЗАВОД «ЭЛЕКТРОТЯЖМАШ», зав. сектором механических расчетов; 61089, Украина, г. Харьков, пр-т Московский, 299; e-mail alex3tretjak@mail.ru, ORCID 0000-0003-4945-5500.

Tretiak Oleksii – Candidate of Technical Sciences (Ph.D.), SE "Plant" Electrotiazhmash", Head of sector on mechanical calculations, 299 Moskovsky Ave, 61089, Kharkov, Ukraine.

Шуть Александр Юрьевич – заступник начальника отдела проектирования гидрогенераторов и КМПТ, ГП «ЗАВОД «ЭЛЕКТРОТЯЖМАШ», 61089, Украина, г. Харьков, пр-т Московский, 299; ORCID 0000-0003-1591-2558.

Shut Olexandr – SE "Plant" Electrotiazhmash", Deputy Head of Department on Hydrogenerators and LDCM, 299 Moskovsky Ave, 61089, Kharkov, Ukraine.

Гакал Павел Григорьевич – доктор технических наук, доцент, Национальный аэрокосмический университет; e-mail: pavlo.gakal@gmail.com.

Gakal Pavlo – Doctor of Technical Sciences, Docent, National Aerospace University, Associate Professor at the Department of Thermal Engineering Aerospace.

Полиенко Владислав Русланович – инженер-конструктор, ГП «ЗАВОД «ЭЛЕКТРОТЯЖМАШ», НАУ «ХАИ»; 61089, Украина, г. Харьков, пр-т Московский 299; e-mail: vlad_polienko@outlook.com, ORCID 0000-0002-2318-0767.

Polienko Vladyslav – design engineer, SE "Plant" Electrotiazhmash"; NAU "KhAI"; 299 Moskovsky Ave, 61089, Kharkov, Ukraine.

Пожалуйста ссылайтесь на эту статью следующим образом:

Третьяк, А. В. Особенности математического моделирования теплового состояния гидрогенераторов капсульного типа / **А. В. Третьяк, А. Ю. Шуть, П. Г. Гакал, В. Р. Полиенко** // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – № 10(1232). – С. 44–51. – Бібліогр.: 6 назв. – ISSN 2078-774X. – doi: 10.20998/2078-774X.2017.10.06.

Please cite this article as:

Tretiak, O., Shut, O., Gakal, P. and Polienko, V. (2017), "Features of Mathematical Modeling of the Thermal State of the Bulb Type Hydrogenerators", *Bulletin of NTU "KhPI". Series: Power and heat engineering processes and equipment*, no. 10(1232), pp. 44–51, ISSN 2078-774X, doi: 10.20998/2078-774X.2017.10.06.

Будь ласка посилайтесь на цю статтю наступним чином:

Третьяк, О. В. Особенности математического моделирования теплового стану гідрогенераторів капсульного типу / **О. В. Третьяк, О. Ю. Шуть, П. Г. Гакал, В. Р. Полиенко** // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – № 10(1232). – С. 44–51. – Бібліогр.: 6 назв. – ISSN 2078-774X. – doi: 10.20998/2078-774X.2017.10.06.

АНОТАЦІЯ Виконано аналіз різних конструкцій гідрогенераторів. Показані переваги та недоліки різних варіантів компонування конструкції в залежності від дії сил різної природи. Проведено розрахункові дослідження в тривимірній постановці за визначенням теплового стану гідрогенераторів капсульного типу. Досліджено можливості введення додаткового охолодження для обмотки статора. Представлена можливість виконання тривимірних розрахунків теплового стану гідрогенераторів капсульного типу з повітряним охолодженням. Проведено дослідження впливу типу турбіни на напружений стан генератора. В роботі приділено увагу застосуванню різних методик розрахунку: метод розгорнутих теплових (еквівалентних) схем; аналітичне рішення теплового стану; методи CFD (computational fluid dynamics) кінцевих елементів. Показано, що застосування методів CFD можливо при доповненні існуючих граничних умов. Визначено початкові і граничні умови для розрахунку складнонавантажених складових конструкції. Вперше виконано та верифіковано розрахунок теплового стану капсульного гідрогенератора з урахуванням основних і додаткових втрат. Результати дозволять підвищити надійність роботи гідроелектростанції та енергосистеми в цілому.

Ключові слова: гідрогенератор, тепловий стан, капсульний тип, тривимірний розрахунок, обчислювальна гідродинаміка

Поступила (received) 08.02.2017